

モンテカルロ法を用いた放射線管理の検討

○下山哲矢、橋本明宏、今井重文、近藤茂実

環境安全技術支援室 放射線安全管理技術グループ

概要

放射線施設の放射線遮蔽計算等には、単純体系で簡易的に計算する方法と実際の施設を模擬した体系でモンテカルロシミュレーションを用いて計算する方法がある。近年、パーソナルコンピュータ（PC）の進歩により、モンテカルロシミュレーションの計算時間が以前に比べずっと短くなり、施設を模擬した計算体系で遮蔽計算等を一般的なPCで行うことが現実的になってきている。一方で、名古屋大学大学院工学研究科・工学部事業所（RI事業所）において、単純体系で遮蔽及び中性子による放射化物の生成等を計算するには困難になった。そこで、今回はRI事業所の変更申請の時に、実際に遮蔽・核反応等の計算に用いたPHITS^[1]（Particle and Heavy Ion Transport code System）を使用して、工学研究科の放射線施設における検討事項に関して計算等を行ったので報告する。

1 放射線管理での計算

放射線管理では、想定される放射能の影響を計算等で行い、法定の基準以下になるように遮蔽、放射性物質等の使用時間、放射性物質の使用量や放射性物質から距離等を管理する。放射線管理上、主になる計算は、放射線業務従事者の被ばく線量、管理区域境界での線量や事業所境界（核燃料物質の規制では周辺管理区域境界）での線量である。計算結果は、放射線管理はもちろんのこと、放射線施設が法定の基準を満たしているかの説明資料に使用される。

線量計算を例に単純体系で簡易的に計算する方法を紹介する。単純体系において、線量（AP）計算は、線源の放射能（S [MBq]）、線源からの距離（R [m]）、線源の実効線量率定数（ Γ [$\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$])、遮蔽体がある場合、各遮蔽体の実効線量透過率（ F_i ）及び作業時間（T [h]）で計算することができ、

$$AP (\mu\text{Sv}) = S \times \Gamma \times F_i \times T / R^2$$

と表すことができる。仮に、⁶⁰Co線源（1 TBq）を用いて、コンクリート1 mを含む距離2 mの位置で1時間作業した場合、作業者が受ける被ばく線量は上記式より、

$$AP (\mu\text{Sv}) = 1 \times 10^6 (\text{MBq}) \times 0.305^{[2]} (\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) \times 1.52 \times 10^{-4[3]} \times 1 (\text{h}) / 2^2 (\text{m}^2) \approx 7.6$$

と計算できる。主要な放射性物質の実効線量率定数及び実効線量透過率は、物理定数として利用することができるため、安全側から計算体系を簡略化できる場合、単純体系で簡易的に計算することが放射線管理においても有益である。

一方、モンテカルロ法を用いた計算は、計算体系を簡易化することが難しい場合（例えば、遮蔽体や構造物からの散乱線の影響等）、多くの放射線管理に必要な情報を得たい場合（例えば、位置、時間、距離を多数の条件で情報が欲しい等）や放射化物の生成等で使用するには大変有益である。モンテカルロ法は、放射線と物質との相互作用を乱数を用いて確率的に計算し、放射線の輸送挙動を計算する方法である。実際の実験とモンテカルロ法で計算した結果等は、よい一致を示しており、実際の放射線規制申請時の説明資料にモンテカルロ法を用いた計算結果を使用した例もある。今回は、申請時に線量や放射化物の生成等の計算に使用したモンテカルロコードPHITS^[1]（Particle and Heavy Ion Transport code System）を用いることとし、放射線施

設検討事項に関して計算等を行ったので報告する。

2 検討事項1（核燃料管理施設）

核燃料管理施設は、名古屋大学で不要となった核燃料物質及び核燃料物質で汚染された廃棄物（廃液を含む）を保管・管理している施設である。核燃料物質の規制上、ウランで300g、トリウムで900gを超えて扱う場合は、放射線管理が必要となる。

当施設は、本学で今後使用される核燃料物質について、使用予定がなくなった場合を想定して全物質を保管できるように貯蔵庫や廃棄物保管庫等が申請・承認されている。そこで、検討事項として、トリウム系の物質についての遮蔽状況について考えた。

トリウム系の物質は鉱石等からの精製過程で、放射平衡が一度、破られていると考えられ、精製後は、トリウム系列で考えると、 ^{232}Th が崩壊して生じる ^{228}Ra の半減期5.75年^[2]の十倍ほど（約50年）で放射平衡に達すると想定される。トリウム系列は、 ^{208}Pb で安定するまでに10回程度の崩壊をしており、中には環境放射線としても γ 線スペクトロメータで測定できる崩壊エネルギーが約2.6 MeV^[2]と比較的高い ^{208}Tl もあるため注意が必要である。

実際の当施設の申請・承認の遮蔽に関する技術的な説明資料では、トリウム系の物質の保管等の扱いについては、精製の時期を考慮して、鉛板で遮蔽することが書かれている。そのため、実際にトリウム系の物質を全量、貯蔵庫に保管した場合、放射平衡に達していると仮定すると鉛の遮蔽は必要なのかをモンテカルロ法を用いて確かめることにした。

貯蔵庫は施設の使用保管室の左中央あたりに置かれており、管理区域境界までの距離は最短で約4mである。貯蔵庫は、耐火性の金庫で、遮蔽体としては、1mm程度の鉄板が2枚で発砲コンクリート7cm程度（通常のコンクリートの約1/2の比重）を挟んだ物と考えることができる。核燃料物質の放射能は高くないため、施設の壁のコンクリートの厚さは比較的薄い。以上を考慮してモンテカルロ法で計算する体系を図1のように作成した。

次に、申請・承認されているトリウム系の物質全量を貯蔵庫に保管した場合を、トリウム系の物質の実際の大きさ等を考えず（トリウム系の物質自体での遮蔽効果も考慮しない）貯蔵庫内にトリウム系の物質全量の点線源があると仮定して実効線量率について計算した。結果を図2に示す。当施設は、管理区域境界（1.3 mSv/3月 \approx 2.6 $\mu\text{Sv/h}$ ）と周辺監視区域（RI規制では事業所境界という）（250 $\mu\text{Sv/3月}\approx$ 0.11 $\mu\text{Sv/h}$ ）は同じ境界に設置されている。申請・承認されているトリウム系の物質全量を一カ所保管した場合、トリウム自体の遮蔽を考慮しないと仮定すると管理区域境界の線量は担保できそうであるが、周辺監視区域境界の線量は超える可能性を否定できないため、鉛板等で遮蔽する必要があると分かった。

次に、ウラン系の物質に関してトリウム系の物質と同時に保管した場合、影響を無視できないのではないかと考え、トリウム系の物質と同様に計算を行った。ウラン系列は、トリウム系列と異なり、半減期が長い核種が存在するため、精製された物質では放射平衡に達していないと考えられる。ウラン系の物質で考慮すべき物質は、図3に示すようにウラン系列とアクチニウム系列に存在すると考えられる。一般的に ^{234}U は、天然ウランであると仮定した場合でも、その存在比は約0.005%^[2]であり、 ^{238}U の約99.27%^[2]と比べると無視できるように思われるが、半減期の差により比放射能（Bq/g）は、それぞれ約12 kBq/gと同程度である。

トリウム系の物質と同様に点線源を仮定して計算した結果を図4に示す。結果から、トリウム系の物質の放射時平衡への遮蔽影響を考慮する場合、ウラン系の物質の線量は少ないため、トリウム系の物質の遮蔽強化を考えればよいことが分かった。

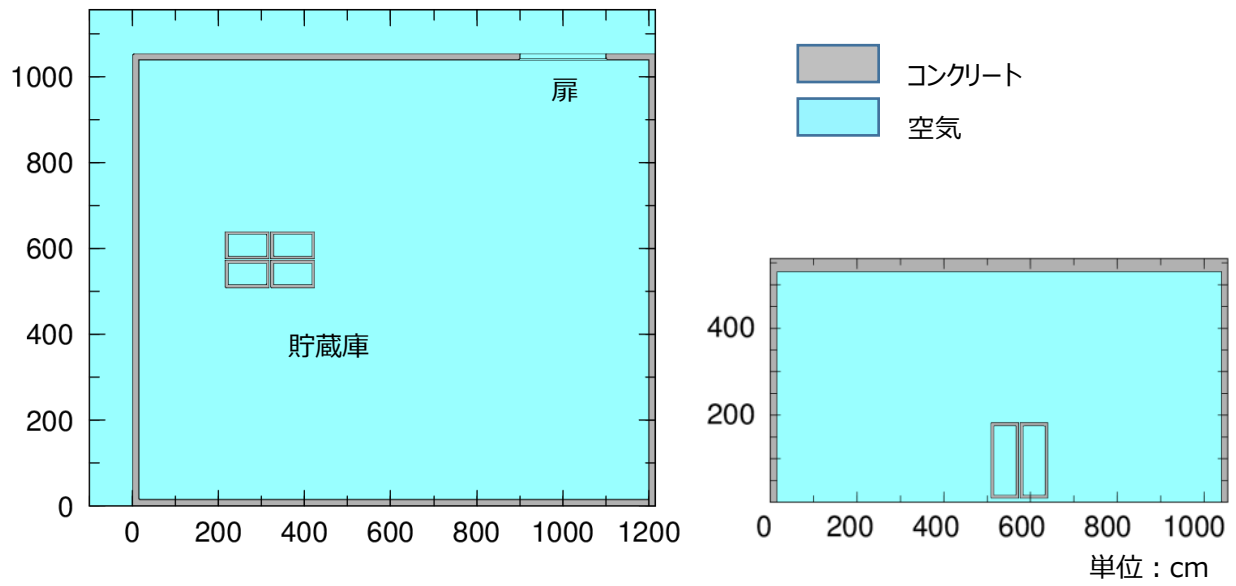


図1. 核燃料管理施設の計算体系断面図

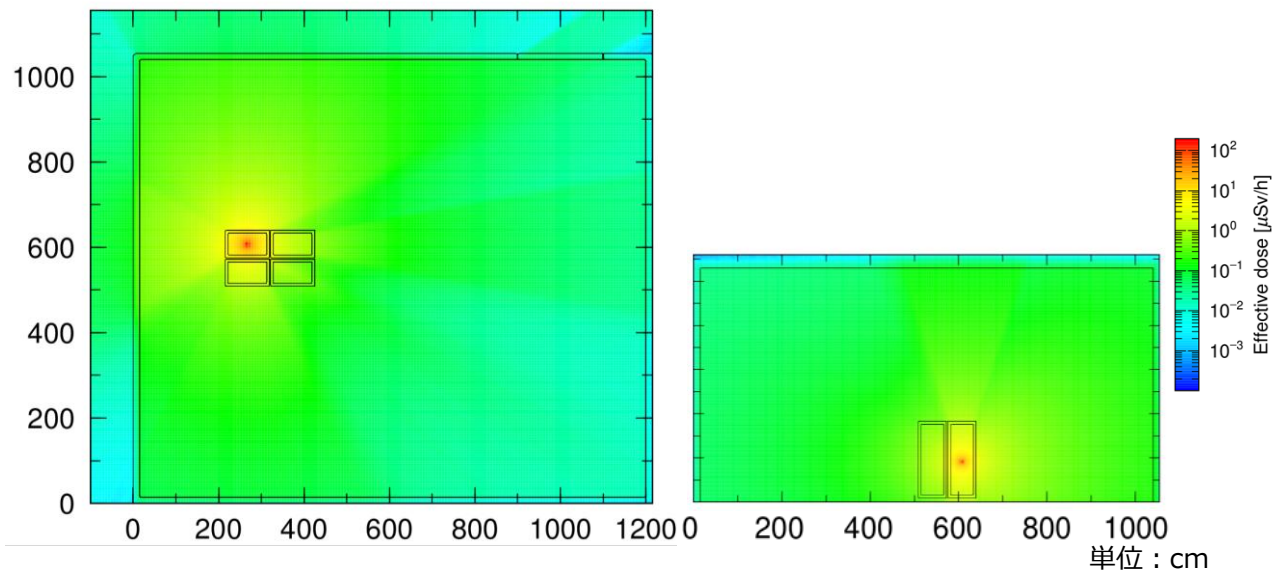


図2. トリウム系の物質計算結果（実効線量率）

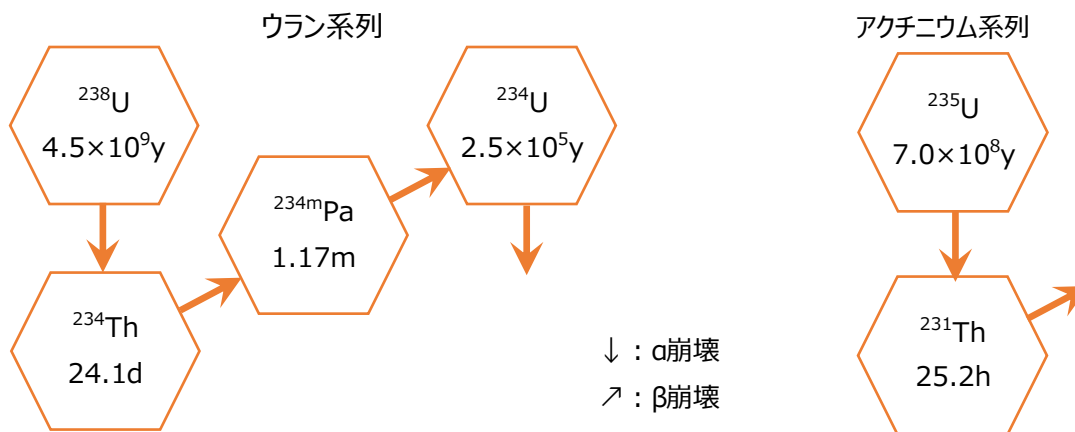


図3. ウラン系物質の考慮すべき崩壊

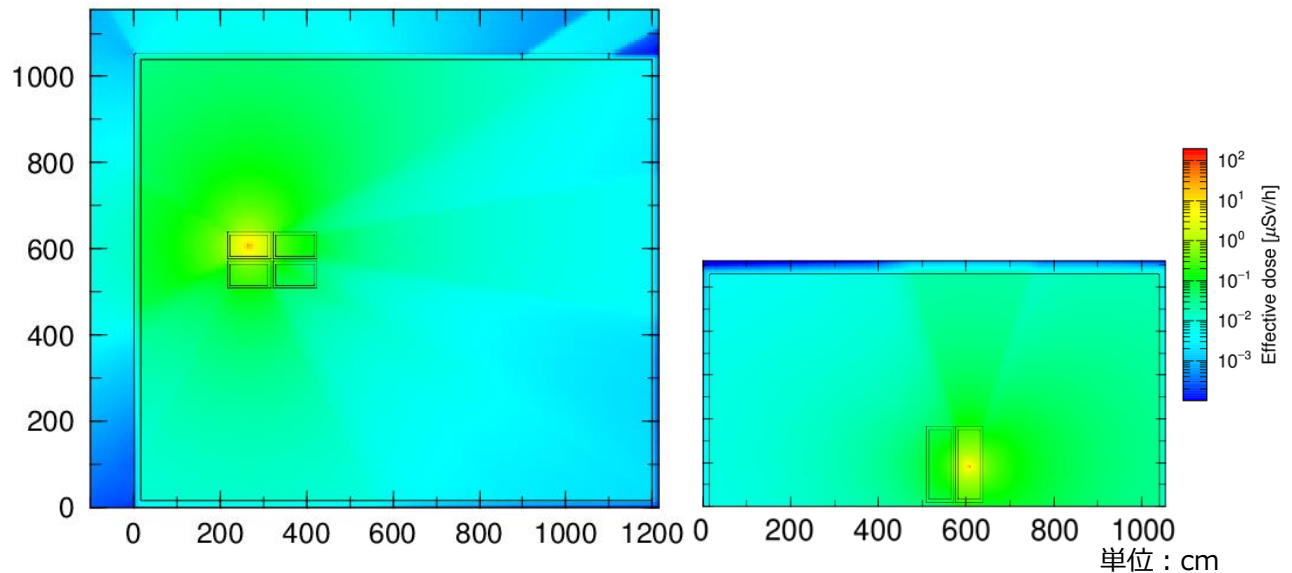


図4. ウラン系の物質計算結果（実効線量率）

3 まとめ

モンテカルロ法を用いて検討事項に関して計算を行った。広範囲の放射線管理の情報が一度の計算で推定できるため、大変有益なツールであることが分かった。今回は、放射線量を計算したが、今後は実際の承認・申請で他の情報に関しても計算が必要になることも考えられるため、他の物理情報に関しても計算のテストを行う予定である。

参考文献

- [1] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
- [2] アイソトープ手帳, 日本アイソトープ協会
- [3] 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル, 原子力安全技術センター